

Sincronización de la llegada de recursos a un plan de perforación de pozos de petróleo y gas offshore a través de Simulación de Eventos Discretos

Manuel Alejandro Colorado ^{a,c}, Laura Alejandra Pai ^{a,c}, Laura Alejandra Reyes ^{a,c}, Jose Alejandro Bernal ^{a,c}, Santiago Arrubla ^{b,c},

^a Estudiante de ingeniería Industrial

^b Director del Proyecto de Grado

^c Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen de diseño en Ingeniería

An offshore drilling plan consists of a series of activities where an activity does not start until its predecessor ends and the required resources are available for execution. These resources require an advance arrival schedule. Due to this lack of planning there is a desynchronization in resources arrival, therefore idle times are generated, which produces extra costs. This lack of planning also increases operation costs and decreases utility. Because of this situation we propose a policy design that seeks the appropriate programming from the input arrival time, which allows a reduction in the expected cost.

In order to find this policy, the deterministic data is verified which is the starting point towards the optimal policy. Starting from the deterministic data analysis, four different policies (or treatments) were proposed. These consist of delaying, delaying-advancing, advancing, and advancing-delaying. This will be explained more specifically in the document. In the process of finding those policies, additional estimates are made, taking into consideration that since the project is about empirical distributions, the theoretical ones won't be taken into account. Then, an estimation of the empirical density function is made using the Kernel method. However, the input data used in the software Flexsim model about the activities duration was found using the survival function.

Subsequently, the model design was carried out based on a drilling plan through Flexsim, which served as the basis for the enaction of the respective simulations of each one of the policies. Then, the four treatments were simulated at three initial levels that correspond to a reduction or increase in percentages as indicated by the policies.

The results of these simulations were subjected to an analysis of variances and additional tests such as lowest significant difference (LSD) and Tuckey, which indicate when there is a significant difference between treatments and allow us to choose among the best treatments without considering those that are statistically similar. In addition, they allow us to study the treatments whose statistical variation positively affects the variable (expected cost). Thanks to these analyzes we find the initially-winning policies against which new levels are raised and other runs are made, in this way we proceed with a new analysis process among all possible combinations until we reach the winning policy.

This policy was again verified with performance indicators which evaluate the variations between the winning and the deterministic policies in order to identify the impact generated by this new policy against what was being implemented. Additionally, in each simulation, checks were carried out to verify that the design has no failures. In this way it is verified that there are no duplicate data or errors from the Flexsim software. The final design of the simulation model can be validated in Annex "Doc 0. Simulation Model".

1. Justificación y planteamiento del problema

Actualmente, se evidencia que uno de los recursos más usados en las industrias es el petróleo; con este, se pueden generar gran variedad de productos con diferentes composiciones químicas, los cuales son utilizados en la vida cotidiana. Por ello, es relevante mencionar que, desde 1970, la economía mundial ha vivido el impacto

negativo de las variaciones de este producto y, según estudios realizados, se puede afirmar que nueve de cada diez depresiones en la economía americana ocurrieron debido a esta oscilación de precios (Stratta, 2016). Dentro de este tipo de industria existen diversos gastos, como los son mano obra, maquinaria e insumos, lo que hace que presente un capital bastante considerable en materia de costos; por lo tanto, cualquier cambio en el proceso puede representar flujos, tanto de manera positiva como de manera negativa (Ghalayini, 2011; Issabayev, 2015).

Dicho lo anterior, esta investigación está enfocada hacia la *planeación* de recursos y materias primas, dado que, de igual modo que en otras áreas, la *planeación* representa un alto grado de importancia en cuanto a la reducción de costos en la operación. Lo anterior debido a que los costos excesivos han sido una de las causas principales del fracaso de los proyectos (Mohammad, Mohammad, Fereydoon & Kobra, 2011). En la práctica, la incertidumbre es inevitable y ocasiona variaciones en la demanda, retrasos en la llegada de insumos y mal funcionamiento de equipo. Este tipo de incertidumbre puede ser controlable hasta cierto punto mediante un tipo de *planeación*, como la que se expone en el presente trabajo (Stratta, 2016).

Dentro de la industria petrolera existen varios métodos de extracción de crudo. Uno de ellos es el proceso *offshore*, el cual consiste en la exploración y producción de petróleo y gas en los océanos, para lo cual es necesario bombear el petróleo y comprimir el gas para el envío a las refinerías (Silcio & Marco, 1997). Adicionalmente, la extracción de crudo *offshore* presenta muchos resultados futuros que son difíciles de predecir, motivo por el cual, para este proceso, aplica lo mencionado anteriormente en relación a la posibilidad de retrasos en la llegada de insumos; esto se asocia directamente con los costos de desarrollo y la futura rentabilidad del proyecto (Haugen, 1996). La empresa petrolera Rosneft, quien es líder en la extracción y refinamiento de crudo del gobierno ruso, brinda un listado de los requerimientos en el proceso de extracción de crudo basándose en la norma ISO GOST 19906. Dentro de los recursos que propone Rosneft para un proceso de *perforación* marítima se encuentran barcos, equipos a bordo, equipos de perforación, equipos de campos petroleros, equipos para la recogida y preparación del petróleo y el gas, equipos de bombeo, ventilación y compresión, equipos eléctricos, materias primas y stocks. Estos insumos y equipos especializados poseen unos costos asociados a su uso, alquiler y deshabitación (ROSNEFT, 2019).

Ahora bien, el desarrollo de una *planeación* permite hacer más rentable el negocio por medio de la optimización de la operación. Dentro de estas operaciones, en donde se busca minimizar los costos en la cadena de suministros de las industrias, existen factores importantes que impactan de manera directa dichas cadenas, como lo son el tiempo de llegada temprana^[1] de un recurso^[2] necesario para realizar un proceso y el tiempo de tardanza del mismo, que excede el tiempo límite establecido para su uso. Para esto, es importante mencionar que dichos recursos son limitados, costosos y que pueden ser utilizados en otros proyectos, es decir, no están disponibles en todo el periodo de tiempo relacionado a un proyecto. Así, cada recurso tiene una fecha de vencimiento, de modo que ningún recurso puede estar disponible antes de su fecha de preparación; sin embargo, estos pueden ser utilizados después de sus fechas límites mediante el pago de tarifas “standby”, dependientes del tipo de maquinaria a utilizar (Haugen, 1996).

Con el fin de disminuir los tiempos de standby^[3] dentro de un proceso, es necesario el planteamiento de un modelo que determine la llegada óptima de los insumos a las perforaciones *offshore*, en donde cada una de las actividades^[4] del proceso no pueda iniciar sin haber terminado la predecesora. Se realizará un ajuste *Kernel* a la función de densidad asociada a los datos, pues consta de mayor precisión y, de esta forma, se podrá utilizar cualquier distribución (Terry, 2012). Sin embargo, es importante mencionar que, en el caso de que no existan estos datos históricos, se acudirá a la opinión de un experto en el área, esto con la finalidad de construir una distribución asociada a esta opinión a través de un P10, P50, P90, que representan las probabilidades para describir el rango de resultados de información disponible (Malinverno, Prange, Gonfalini, Moffat, Swager, D, Theys, & Verga, 2003).

La desincronización^[5] en la llegada de recursos representa un aumento de costos considerable dentro del plan^[6] de *perforación offshore* y, en general, en muchas de las industrias que manejan una programación de tiempos para sus recursos tanto físicos como intangibles. Por esto, se vuelve fundamental el uso de una herramienta práctica que pueda marcar un camino o guía a seguir para mitigar estos costos, con el fin de lograr hacer la operación más rentable. No obstante, no necesariamente una *planeación* determinista equivalente al tiempo esperado producirá la política adecuada, pues, precisamente, hay una diferencia en los riesgos que se asumen.

Se plantea trabajar sobre un plan de *perforación offshore*, el cual se define como una secuencia de actividades que requieren la llegada de ciertos recursos y solo se pueden iniciar después de la finalización de su actividad predecesora. Se implementará un modelo de simulación para la programación del instante de arribo de los recursos para cada actividad dentro del plan de *perforación offshore*. Para el desarrollo de dicho modelo, se tendrán en cuenta tres premisas principales:

- La llegada de recursos temprana implica el cobro de una tarifa standby por parte del proveedor, puesto que, debido a que no se ha finalizado la actividad predecesora, se genera un tiempo ocioso del recurso esperando a ser utilizado;
- La llegada de recursos tardía^[7] implica un tiempo ocioso en todos los demás recursos que están a lo largo de cada una de las actividades, lo que también conduce a alargar el tiempo de la operación y sus recursos. Esto es traducido en un aumento de costos;
- El tiempo de duración de las actividades dentro del proceso se distribuye de manera estocástica, por lo cual se asume que tienen una distribución de probabilidad generadora de las duraciones y se supone independencia entre actividades.

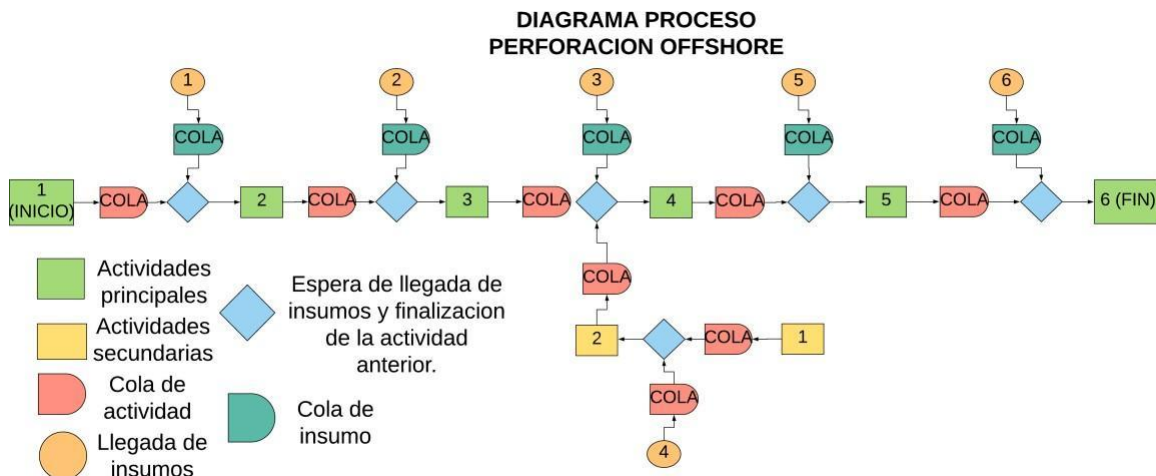


Figura 1. Diagrama plan de perforación

En la Figura 1 se observa un grafo que representa el diagrama de procesos de un plan de *perforación offshore* común. Se puede observar una línea de actividades principales (recuadros verdes), acompañada de actividades secundarias (recuadros amarillos), unos círculos naranjas que representan la llegada de recursos, semicírculos rojos que representan el tiempo de espera luego de que acaba la actividad, semicírculos verdes que representan el tiempo de espera luego del arribo de un insumo y, por último, rombos azules para representar la convergencia entre la llegada del recurso y la finalización de la actividad anterior para continuar el proceso. Para que cada una de estas actividades inicie, resulta imperativo que todos los elementos necesarios estén en la convergencia (rombos azules), es decir, que los recursos lleguen en el momento en que la actividad predecesora haya finalizado, para que se pueda iniciar la actividad siguiente.

2. Antecedentes

A lo largo de la historia se han evidenciado diferentes tipos de problemas logísticos en diversas áreas de la industria de manufactura y servicios; tradicionalmente, se ha realizado de forma individual la toma de decisiones y la planificación de las operaciones en cada una de las áreas. Adicionalmente, no se tenía en cuenta la demanda o la incertidumbre por la estocacidad de la misma, por lo que surgían siempre dudas de su existencia (Ayuso, Escudero, Garin, Ortuño & Perez, 2003). Sin embargo, en los últimos años, la administración de la cadena de suministro ha generado que en la *planeación* y programación de operaciones se tenga en cuenta una estrategia para minimizar costos totales y aumentar la flexibilidad en los procesos, en donde exista la necesidad de tener relaciones entre todos los niveles de la cadena de suministros.

Como método en la ejecución de los problemas logísticos se integran diferentes estrategias, entre ellas la optimización robusta (Albornoz y Contesse, 1999) y el desarrollo de múltiples experimentos aleatorios para la investigación de una hipótesis o un conjunto de estas. En un caso puntual, se aborda un problema integrado de planificación y ejecución de la producción y transporte en la cadena de suministro; para esto, se usan dos modelos, debido a la complejidad de la solución de este problema. El primero es un modelo de programación lineal estático, el cual garantiza la planificación agregada dentro de ciertos intervalos de tiempo de constancia. El segundo modelo es un control óptimo programable, el cual proporciona una representación dinámica de la estructura de la cadena de abastecimiento y la planificación de procesos dependientes del tiempo (Ivanov, Sokolov & Kaesche, 2010). En los problemas puntuales de planificación y ejecución de proyectos a corto, mediano y largo plazo, existen varios componentes que aquejan un nivel de estudio especial y que, de algún modo, se determine una estructura que logre la disminución en aquellas características que no aportan valor significativo en el desarrollo de un proceso determinado.

La *planeación* de actividades es de gran importancia. Un ejemplo de ello es la agendación de citas odontológicas, donde su programación puede tener espacios para pacientes adicionales, generando costos sobre el tiempo muerto. También existen las prácticas en donde no es posible la programación de pacientes nuevos hasta una cantidad de tiempo prudente; esto ocasiona el no lograr atender a algunos de ellos, lo que acarrea un costo asociado a la inconformidad del paciente y un aumento de estrés por parte del odontólogo. La falta de equilibrio entre la cantidad de pacientes sin atender y los que no son agendados afecta el rendimiento, generando cargas desiguales y menor producción en cierto periodo de tiempo. En este ejemplo puntual se debe tener en cuenta, para mitigar dicho problema, el adherir un objetivo de producción por un intervalo de tiempo determinado, para que los pacientes encajen de manera acertada en estos intervalos específicos de tiempo. Para ello, es necesario definir los parámetros que determinan el sistema de atención de pacientes, como lo son el número de sillas, la cantidad de asistentes, los horarios y los tiempos de procesamiento del servicio (Levin, 2015). Cabe resaltar que en un sistema de citas se suponen los tiempos de servicio aleatorios, donde el horizonte de *planeación* es finito, limitado por el número de pacientes (Erdogan & Denton, 2011).

Frente a este ejemplo, es posible comparar el trade-off de programar la llegada de los recursos, tal que se mitigue los efectos de que lleguen temprano o tarde, con el trade-off de agendar un número de citas, de manera tal que no se agenden demasiadas, pero tampoco muy pocas. Esto debido a que los extremos de cada decisión resultan en un sistema ineficiente, donde asignar demasiadas citas se traduce en carga de trabajo desigual, mayor estrés y tiempos de espera largos para los pacientes, debido a la estocacidad en el tiempo de atención. Así mismo, asignar muy pocas citas conlleva a tiempos ociosos del odontólogo y menor producción de lo que indicaría el tiempo invertido (Levin, 2015). La única diferencia es que, en el presente caso, se tiene una secuencia de actividades que agrava el problema, las cuales, además, pueden darse en forma paralela, como se representa en la Figura 1. Por esta misma razón, se parte de la consideración de que el problema es un buen candidato a un modelo de simulación de eventos discreto, pues dicha metodología facilita tener en cuenta las complejidades descritas.

Otra expresión del problema tratado se encuentra en la industria del transporte aéreo: el overbooking es utilizado como estrategia para disminuir el número de puestos vacíos por viaje y mitigar los riesgos monetarios asociados a la operación. Sin embargo, esta estrategia genera pasajeros inconformes que al presentarse en su vuelo no encuentran un espacio por el cual ya habían pagado antes; así, estos pasajeros pierden fidelidad con las aerolíneas (Wang & Fung, 2014). Las aerolíneas no pueden tomar el riesgo de dejar vacantes en un vuelo, por lo cual es necesario manejar la disyuntiva en un punto equilibrado, donde la opción más viable sea aquella donde el riesgo sea el mínimo, es decir, si el trade-off de llevar puestos vacíos en un trayecto resulta en niveles más altos de riesgo que el trade-off de fallarle a los pasajeros debido a la sobreventa, la aerolínea deberá ajustar sus políticas a lo que acarree en menos escollos para su nivel productivo.

A partir del caso anterior, se propone como solución la alianza estratégica entre dos o más aerolíneas, la cual permita la integración de aquellos pasajeros afectados por la sobreventa de tiquetes a vuelos de las aerolíneas de la alianza que tengan el mismo destino. Para esto, se simula una alianza en un vuelo I y un vuelo J, cada uno con una capacidad determinada, en la simulación para cada experimento se representa la salida de ambos vuelos, uno consecutivo del otro. Una vez se completan los experimentos de simulación, se reconoce el beneficio neto para cada vuelo, que no es más que el costo monetario (Wang & Fung, 2014). Esta es la razón principal por la cual el mecanismo propuesto puede traer beneficios a la alianza, teniendo en cuenta, además, que este segmento del beneficio no se ve afectado por el tipo de pasajero. Este dilema que se evidencia en las industrias se basa en que se debe sacrificar algún recurso cuyo impacto sea de menor escala en la productividad. Una forma de reducir dicho impacto es la asociación de agentes que logren mitigar el riesgo del trade-off asociado a cada decisión frente a cualquier disyuntiva.

Frente a un problema de diseño de la red de servicio en los sistemas de transporte de carga, en actividades de transporte como la demanda y el tiempo de viaje, de naturaleza estocástica, se plantea que la correcta planificación de los elementos o actores involucrados en el conjunto de dichas actividades garantiza una política de servicio óptima. En este problema se tienen en cuenta, adicionalmente, características que afectan significativamente el desarrollo del modelo, como lo son el tiempo de liberación y el tiempo de vencimiento. Estas características determinan un trade-off similar a los dilemas tratados: dichos tiempos corresponden al momento en que la mercancía está lista para el transporte; cuando el tiempo de liberación es mayor al tiempo de vencimiento se produce una penalización monetaria, mientras que el tiempo de liberación temprano aqueja tiempo ocioso en los trabajadores, que a su vez representan costos (Bahar, Jaoua, Jbir y Makhoulouf, 2018).

El concepto básico de este método es utilizar un módulo de optimización para encontrar un conjunto de valores para los parámetros de entrada y emplear las respuestas generadas por la salida del modelo de simulación para buscar para la siguiente solución de prueba. Esta búsqueda iterativa tiene como objetivo encontrar un conjunto de valores de entrada con la mayor contribución a los indicadores de rendimiento (Bahar, Jaoua, Jbir y Makhoulouf, 2018).

3. Objetivos

General:

- *Reducir los costos esperados asociados a los tiempos de ejecución en un proceso de perforación offshore, producidos por la desincronización en la llegada de recursos a cada una de las actividades, por medio del desarrollo de un modelo de simulación que permita generar una política de sincronización de llegada de recursos.*

Específicos:

- Construir un modelo de simulación a partir del proceso de perforación offshore, que permita realizar un diseño de experimentos sobre la data estudiada;

- Identificar y mapear las diferentes distribuciones empíricas asociadas a cada una de las actividades dentro del proceso de perforación offshore, por medio de las herramientas de simulación planteadas;
- Crear una política para un proceso de perforación offshore, la cual garantiza la sincronización de llegada de recursos en cada una de las actividades, minimizando los costos y la variabilidad;
- Analizar la influencia del poder de negociación con proveedores de recursos dentro de los costos y la variabilidad asociados a los tiempos ociosos;
- Medir la variabilidad de costos y los tiempos de ejecución en el proceso de perforación offshore, luego de la implementación de la política propuesta;
- Evaluar el impacto de la desincronización en los tiempos y los costos asociados a la incertidumbre, generados dentro del proceso de perforación offshore, gracias a la implementación de la política propuesta por el modelo de simulación.

4. Cuerpo del documento

El propósito del caso de estudio es la programación de los recursos asociados a las actividades, tal que el costo esperado del proceso sea el mínimo. Para el desarrollo de este propósito, se parte, en primera instancia, de los tiempos históricos, brindados por un experto, para cada una de las actividades. Con el fin de tener un acercamiento más puntual y preciso en el caso de estudio trabajado, es necesario que dichos tiempos históricos eviten un emparejamiento a cierto tipo de distribución teórica, esto con el fin de evitar pasar por alto datos relevantes propios de la distribución empírica. Además, por medio de la estimación no paramétrica de la función de densidad por el método *Kernel* se puede realizar la construcción de una función de densidad para la duración de las actividades del plan, en torno a valores muestrales, el cual se puede observar en el anexo “Doc 2. Kernel”.

Para lo anterior, haciendo uso del complemento *NumXL* es posible realizar una estimación de la función de densidad de los tiempos de las actividades por medio del método *Kernel*, teniendo en cuenta los siguientes parámetros: por un lado, el ancho de banda óptimo de la estimación (H^*), que no es más que la influencia de cada valor muestral con respecto a los demás puntos y , por otro lado, el tamaño muestral (N), que para este caso de estudio corresponde a 78 tiempos. En la Ecuación 1 se puede observar la ecuación correspondiente al método *Kernel*, en donde h es el ancho de banda y k es la función *Kernel* asociada a cada dato con ciertas características. En el caso puntual, se asumirá una distribución Gausiana con media X_i .

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h} K\left(\frac{x-x_i}{h}\right); h=0,5417$$

Ecuación 1. Método Kernel

Partiendo de lo anterior, se entiende la muestra dada no como funciones de densidad teóricas sino como empíricas, lo cual permite comprender el uso de la función de fiabilidad, también conocida como función de supervivencia. Esta función mide, en términos de probabilidad, que una entidad sobreviva más allá de un periodo de tiempo dado. En el presente caso, se medirá la probabilidad de que la actividad haya finalizado en un tiempo determinado. El estimador Kaplan Meier de la función de supervivencia está representado por la Ecuación 2,

$$\hat{S}(t) = \prod_{t_i < t} \frac{n_i - d_i}{n_i}$$

Ecuación 2. Estimador Kaplan Meier

donde d_i corresponde al número de muertes justo antes del tiempo T_i y donde n_i es el número de supervivientes justo antes del momento t_i . Esto determina la probabilidad estimada de que la actividad haya finalizado más allá de determinado tiempo. En el caso práctico, para cada actividad se tienen una serie de datos con su duración, los cuales son el punto de partida para hallar un conjunto de tiempos ajenos a la muestra, con el fin de poder evaluarlos respecto a la muestra de la actividad. Para ello, se calcula el máximo y el mínimo de la muestra, que sirve para encontrar el **paso** con el cual se construirá el conjunto de datos evaluador. En el anexo “Doc 3. Función de supervivencia” se encuentra el archivo donde se realizaron los cálculos propios de este proceso, desde lo cual se partió para generar este conjunto de datos que permitieron llegar a la función de supervivencia.

Una vez se tiene el conjunto de datos evaluador, es necesario contrastarlos con los de la muestra de la actividad; esto mediante una matriz que compara los datos de la muestra con los del conjunto evaluador. De esta manera, cada dato del conjunto determinará si, en ese instante, el dato muestral es mayor. Si esta condición se cumple, se considera como una actividad finalizada; de lo contrario, será una actividad no finalizada. Posteriormente, desde los finalizados y no finalizados se calcula la probabilidad y, a partir de ello, se obtiene la gráfica de función de supervivencia, la cual se muestra en la Figura 2. Esta función de supervivencia resulta útil en la medida en que se pueden generar varios números aleatorios que determinan una distribución específica para cada una de las actividades, ya que para cada aleatorio de 0 a 1 existe un tiempo, usado posteriormente en el modelo de simulación.



Figura 2. Función de supervivencia

Debido a la variabilidad de la duración de las actividades, el costo de la llegada temprana o tardía de los insumos converge con una programación precisa de esta llegada, que de alguna forma minimice el costo total del proceso. Allí es donde la función de supervivencia es de gran utilidad, debido a que permite hallar los tiempos propios de la distribución empírica a partir de múltiples aleatorios, esto con el fin de mantener el fundamento de un diseño experimental.

Inicialmente, se asocia el procedimiento como un diseño experimental, teniendo como variables de entrada los diferentes tiempos de arribo para cada una de las actividades. A partir de allí, se establece un interés particular del experimento, el cual consiste en determinar el ajuste de los tiempos de llegada (+) que tienen mayor influencia, para que la variable de respuesta costo esperado (y) se encuentre cerca al valor mínimo y su variabilidad sea reducida.

Para la programación de la llegada de insumos, el primer paso es hallar el valor esperado de la duración de las actividades a partir de las funciones de supervivencia, lo cual se entiende como la política determinista. De esta forma, se puede encontrar la variable de respuesta inicial, la cual sirve como punto de referencia para el resto de las pruebas realizadas. Teniendo en cuenta que la función de supervivencia toma valores de 0 a 1, se toma la probabilidad 0,5 para hallar los tiempos esperados correspondientes a la duración de cada actividad. Se toma la duración de la actividad dado que se piensa que los insumos serán programados para el tiempo exacto cuando inicia la siguiente actividad, según las duraciones acumuladas.

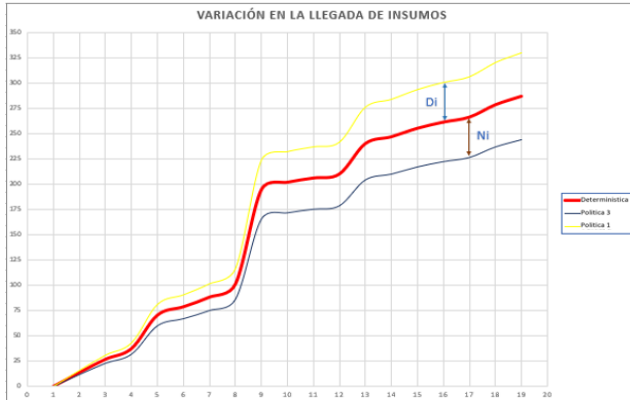


Figura 3. Gráfica política 1 y política 3

Las variaciones consisten en modificar el momento de llegada de los insumos. Para esto, se plantean cuatro políticas diferentes:

Política 1 (P1): siempre pedir con retraso los insumos.

Política 2 (P2): inicialmente pedir con retraso y luego de cierto punto pedir con anticipación.

Política 3 (P3): siempre pedir con anticipación los insumos.

Política 4 (P4): pedir con anticipación al inicio y luego de cierto punto pedir con retraso.

De este modo, se contemplan las diferentes formas en las cuales la compañía puede realizar sus pedidos; esto se puede observar con un ejemplo gráfico en la Figura 3. Allí, se evidencia cada actividad con el tiempo correspondiente del arribo programado de insumos según cada política. En primer lugar, se tiene la política determinística, que es el punto de partida de todo el experimento: en la política 3 hay un diferencial N_i asumido arbitrariamente, que se traduce en el tiempo de **anticipo** de la programación de la llegada de insumos, mientras que el diferencial D_i de la política 1 se traduce en **retraso** de esta programación.

Frente a lo anterior, las políticas 2 y 4 presentan una variación en su diferencial. La política 4 empieza con un diferencial de **anticipo** en la programación hasta el punto P_i expresado en la Figura 4; en este punto de inflexión, la política cambiará de sentido y ahora tendrá un diferencial de **retraso** hasta el final del plan. Todo lo contrario, ocurre con la programación de la política 2, donde se empieza con un diferencial de **retraso** hasta el punto de inflexión P_i , donde se empezará a **anticipar** la programación de los recursos.

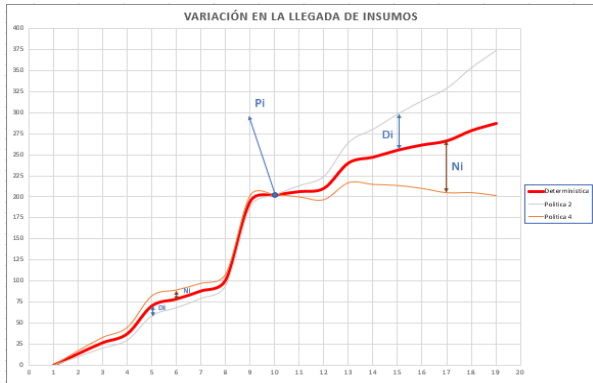


Figura 4. Gráfica política 2 y política 4

Posterior a la definición de las políticas, se define un esquema de trabajo con el fin de buscar la variación que permita minimizar la variable de respuesta. El esquema planteado se muestra en el Figura 4. Allí, se puede observar la metodología planteada para la variación de los escenarios, buscando en cada paso una guía para llegar a la mejor variable de respuesta posible. De esta manera, se tiene como primera línea la política determinista y, a partir de ello, se plantean dos métodos de trabajo; uno de ellos es basar las variaciones de los tiempos por actividad o acumulados.

En los anexos “Doc 4. datos totales acumulado” y “Doc 5. datos totales por actividad” se muestra cómo se realiza el cálculo de ambos métodos, esto con el fin de buscar la influencia que podría tener el calcular los tiempos de diferente manera. Por un lado, la realización por actividad hace referencia a sumar la media de la actividad más el porcentaje de la media acumulada. Por otro lado, el método por acumulados corresponde a sumar y obtener el porcentaje desde la media acumulada. Estos cálculos se enseñan detalladamente en los anexos “Doc 7. Determinística”, “Doc 8. Política 1”, “Doc 9. Política 2”, “Doc 10. Política 3” y “Doc 11. Política 4”, donde se encuentran la política determinista y las cuatro políticas en diferentes hojas con sus respectivos cálculos, dependiendo del enfoque.

En los anexos previamente mencionados se pueden observar diferentes valores asignados a partir de la política determinista para retrasar o anticipar. Según el enfoque de cada política, estos valores serán llamados niveles a lo largo del trabajo y corresponden a las diferentes variaciones porcentuales frente al enfoque de cada política. Los niveles asignados en un caso inicial son tres, para luego asignar dos adicionales:

- Nivel 1 (N1):* reducción o aumento del 15%
- Nivel 2 (N2):* reducción o aumento del 20%
- Nivel 3 (N3):* reducción o aumento del 30%
- Nivel 4 (N4):* reducción o aumento del 40% (adicional)
- Nivel 5 (N5):* reducción o aumento del 50% (adicional)

Dichos niveles fueron asignados arbitrariamente, para dar una vista general del camino a tomar mediante los resultados adquiridos.

Como se observa en el anexo “Doc. 31”, correspondiente a la metodología de trabajo, se toman dos caminos para llegar a los resultados finales. Inicialmente, se realizan las corridas con diferente conjunto de datos aleatorios por medio del software *Flexsim*. Dicho software permite la simulación de eventos discretos; en él se pueden modelar, analizar, visualizar y optimizar cualquier tipo de procesos industriales, en este caso un plan productivo de perforación Offshore. Para empezar a modelar dentro del software, se toma como punto de partida el plan representado en la Figura 5, en donde cada uno de los círculos numerados representa una actividad diferente, obteniendo 19 diferentes actividades en la línea principal y ocho actividades en la línea secundaria, para un total de 27 actividades y cinco diferentes fases.

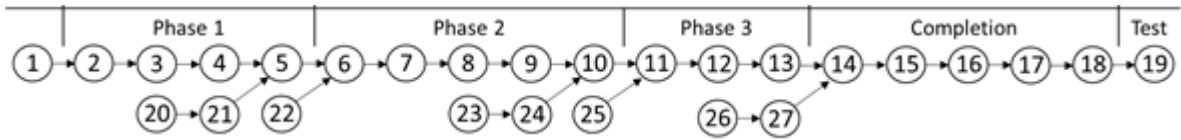


Figura 5. Esquema del plan de perforación

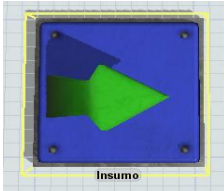


Figura 6. Fuente Insumos



Figura 7. Cola de espera



Figura 8. Procesador

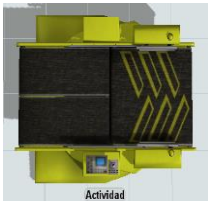


Figura 9. Combinador



Figura 10. Estante

La representación gráfica dispuesta en el programa de cada uno de los elementos significativos del modelo aquí se muestra en las Figuras 6, 7, 8 y 9, donde la Figura 6 corresponde a la representación de la llegada de insumos a cada una de las actividades -cabe recalcar que solo llega un tipo de insumo a cada actividad-. La Figura 7 representa las colas en las que los insumos tienen que esperar para poder entrar a cada una de las actividades y ser procesados. La Figura 8 representa las actividades número 1, 20, 23 y 26, debido a que son aquellas que son punto de inicio y no requieren más de un insumo para ser desempeñadas. La Figura 9 representa

el resto de las actividades que comprenden el uso de diferentes recursos, dado que combinan los diferentes insumos que se necesitan del diagrama. Finalmente, la Figura 10 representa el lugar de almacenamiento del producto final.

Posterior a la realización del modelo en *Flexsim*, el cual se puede observar en el anexo “Doc 0. Simulation Model”, se procede a usar la herramienta *Experimenter*, la cual permite la realización de réplicas bajo uno o varios escenarios. Como se menciona anteriormente, el punto de partida consiste en ingresar cada escenario referente a cada política y a cada nivel por separado, de tal manera que los aleatorios que se tomaban en cada corrida serían diferentes. Frente a esta primera fase, se encuentra que los mejores resultados corresponden al método por acumulados y a las políticas 1 y 2 en niveles 2 y 1, correspondientemente.

Ahora bien, como se observa en el anexo “Doc 15. Realizaciones simultáneas para las políticas”, también se tiene en cuenta otro camino, que corresponde a hacer una misma corrida, tomando diferentes escenarios correspondientes a las variaciones de estos tiempos de entrada según la política y el nivel. Este segundo experimento se realiza por nivel, es decir, no se ingresa la totalidad de las variaciones entre políticas y niveles; se toma cada nivel diferente y sobre cada uno se evalúan las cuatro políticas.

Los datos arrojados por el software corresponden a los tiempos promedio de espera en cola, los cuales se transfieren a Excel para sacar los costos asociados a esta espera. Al tener los tiempos y costos particulares, se sacan los costos totales por cada una de las 500 réplicas y, a partir de esto, se obtiene la distribución de dichos costos. Lo anterior se puede evidenciar en los anexos “Doc 8. Política 1”, “Doc 9. Política 2”, “Doc 10. Política 3” y “Doc 11. Política 4”, donde se encuentra la razón de las decisiones iniciales. Este mismo proceso se realiza con el método simultáneo; la única diferencia es que no se toma cada política por aparte, sino que se encuentra el resultado simultáneo en el mismo archivo.

A partir de los resultados arrojados por el software, se procede con un análisis de varianzas por medio del cual se comparan los tratamientos según cada nivel. El estudio posterior al ANOVA se puede realizar mediante diferentes métodos, como lo son la diferencia mínima significativa (*LSD*), *Tuckey*, *Duncan*, *Dunnet*, entre otros. La diferencia entre estos métodos radica en la potencia que pueden tener para identificar las diferencias entre las medias; entre más un método pueda detectar diferencias más pequeñas se dice que es más potente. El método *LSD* tiene una potencia relevante, dado que permite declarar significativas diferencias aún si estas son muy pequeñas; este es el motivo por el cual se usa como uno de los métodos de comparación. Sin embargo, dada la potencia de este método, se trabaja con un método adicional que es *Tuckey*, con el fin de no caer en errores, dado que este es un método más conservador.

Al recopilar todos los experimentos realizados hasta el momento, se tienen dos métodos y tres niveles. Sin embargo, al remitirse a los resultados de las políticas ganadoras hasta este punto, en cada caso se puede evidenciar que existe una amplia diferencia a favor del método por acumulados respecto al método por actividad. Se puede apreciar que en la Figura 19, en el lado izquierdo, se encuentra la política determinista sobre la línea principal del plan y en el lado derecho se encuentra la determinista respecto a la línea alterna del plan. Como se puede observar, las líneas en colores naranjas son las acumuladas y las que se encuentran en colores morados son las del método por actividad; por tanto, se evidencia que en el método por acumulados la diferencia respecto a la determinista es mayor y es por ello que representa un mayor cambio y una mayor reducción frente a la política por actividad. Debido a esta conclusión, se decide proceder con el método por acumulados para explorar otras variaciones en los tratamientos.

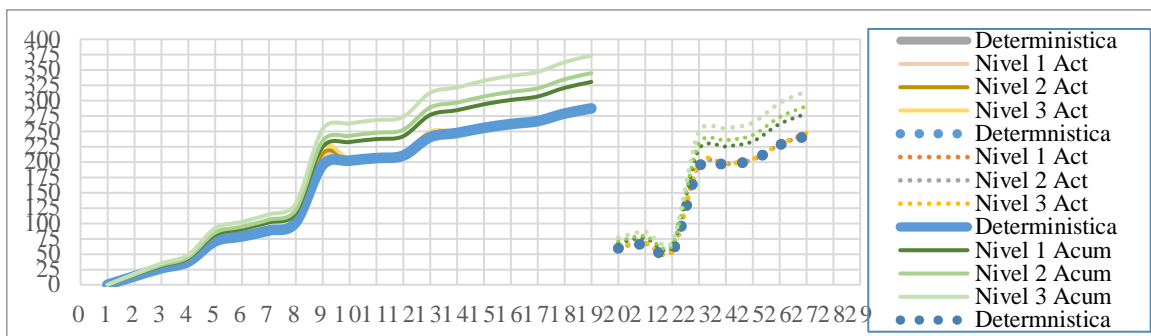


Figura 11. Comparativa política determinista con niveles acumulados y por actividad.

Estos primeros niveles brindan un rumbo inicial, desde el cual se decide ahondar en las dos mejores políticas (1 y 2), haciendo pruebas con más niveles y, en el caso de la Política 2, también variando el punto de cambio. Desde estas variaciones se observa que, inicialmente, es mejor ir por el camino simultáneo, lo cual es de esperarse, dado que realizar las corridas con los mismos aleatorios ayuda a reducir la variabilidad del experimento. Pese a que en las pruebas iniciales es mejor el camino simultáneo, se toman las dos mejores políticas y se ponen a prueba con dos nuevos niveles y en cinco puntos de cambio para la Política 2. De esta manera, es posible encontrar cómo va cambiando la variable de respuesta y por cuál camino seguir según los resultados.

Por un lado, se encuentra que, en el método mismo conjunto de datos aleatorios, la mejor política corresponde a la Política 2 (atrasar y luego adelantar) en el punto de cambio 8, debido a que en la comparación el valor esperado en contraste con la varianza y el coeficiente de variabilidad es menor respecto a los demás. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la segunda mejor política fue la Política 1 (solo atrasar) en el método diferentes aleatorios.

Se debe considerar que estos resultados han sido reducidos con base en la política determinista sin tener en cuenta el poder de negociación. El resultado de una programación adecuada de los insumos, fuera de los beneficios económicos en el proceso productivo, representa la capacidad superior que se tiene como agente económico a la hora de influir en las decisiones de los proveedores que suministran estos insumos. En otras palabras, el resultado de una política correcta permite que la empresa tenga un poder de negociación con los proveedores, ya que al tener certeza del tiempo de pedido de los insumos es posible establecer una reducción en los costos. Dada esta certeza, los proveedores se beneficiarían puesto que también podrán tener una programación efectiva de su producción, reduciendo costos asociados a los pedidos impredecibles y esporádicos.

Es importante tener en cuenta que la compañía, de forma intuitiva, siempre ha utilizado una política de solo anticipar con el fin reducir el tiempo y no detener el proceso productivo, dado que, de forma errónea, se piensa que al anticipar siempre se tendrán los recursos a la mano; por lo tanto, intentan dar mayor importancia a la espera del proceso que a la espera de los insumos. Es comprensible el hecho de dar mayor importancia al proceso, dado que no se desea detener nunca la operación y pueden tener mayor poder de negociación con sus proveedores; sin embargo, es importante resaltar la influencia en términos de costos que tiene la llegada tardía de insumos.

Dado que la política actual (determinista) maneja un enfoque más conservador, no se consideran los costos relativos a los insumos, por lo cual se encuentra como mejor resultado la Política 2, donde solo se anticipa al final. Lo anterior tiene sentido gracias a que la anticipación ayuda a que los procesos no se estancuen. Se encuentra que hay un punto en el cual se equilibran la anticipación y el retraso tal que se reducen los tiempos, teniendo en cuenta que, si bien es importante el proceso, también representa dinero la espera de insumos. Estos costos también se ven reflejados en temas de espacio y almacenamiento.

5. Componente de Diseño en ingeniería

El diseño se presentará mediante el uso de un modelo de *simulación de eventos discretos*. Esto a partir del software *Flexsim*, en donde, mediante la metodología *Kernel* se ajustan las distribuciones empíricas de la duración de las actividades, partiendo desde una base de datos para simular las diferentes políticas de la programación de insumos adecuada, tal que proporcione la mejor opción en este plan de perforación *offshore*.

Para empezar a modelar dentro del software, se toma como punto de partida el plan representado en la figura 5, en donde cada uno de los círculos numerados representa una actividad diferente, obteniendo 19 actividades diferente en la línea principal y ocho actividades en la línea secundaria, para un total de 27 actividades y cinco diferentes fases. Este modelo se plantea usando el software *Flexsim*, como se enseña en el anexo “Doc. 0. Simulation Model”, donde aparece la imagen con las figuras previamente descritas. Sin embargo, fue necesaria la modificación en el sistema de colas que se presenta de forma predeterminada del software, ya que existe una condición en la cual el procesamiento de espera de una de las colas del elemento combinador es omitida y, al contrario, se espera en el mismo elemento del combinador, proporcionando datos erróneos en las esperas de dichas colas.

Para que se desarrolle de una forma adecuada la ejecución del software y del modelo planteado, es necesario establecer unos requerimientos de diseño que aportan un resultado preciso y correcto. Por una parte, en el caso de estudio, un requerimiento es que en las colas asociadas a una actividad no pueden representar datos en cada una de ellas, es decir, que para una actividad que requiere dos colas no puede haber datos en las dos, ya que esto representaría que ambas colas están esperando sin tener ninguna restricción.

Por otra parte, para que la cuantificación de algunas colas no se vea truncada por la condición del elemento combinador, es necesario crear un sistema de señales que funcione como compuertas donde se bloquee la entrada del combinador y se active cuando se haya cuantificado la espera en dicha cola. Así, se podrá tener una respuesta acertada en el análisis de datos.

Para realizar una comprobación del requerimiento de desempeño, se realiza una prueba de comparación de los resultados de las colas, en la cual se contrastan ambos datos, que se pueden ver en los anexos “Doc. 20. Comprobación política 1”, “Doc. 21. Comprobación política 2 al 8”, “Doc. 22. Comprobación política 2 al 9”, “Doc. 23. Comprobación política 2 al 10”, “Doc. 24. Comprobación política 2 al 11”, “Doc. 25. Comprobación política 2 al 12”, “Doc. 26. Comprobación política 3” y “Doc. 27. Comprobación política 4”. En primer lugar, esto es un indicador real para identificar la llegada tanto temprana como tardía de los recursos y, en segundo lugar, se identifica un posible error en la simulación, que genere ambos datos de la cola, lo que previamente se había descrito como un error.

En cuanto a la cuantificación de las colas asociadas al combinador que presentan la condición de espera en el elemento combinador y no la propia cola, se logra tener una comprobación con la prueba anteriormente mencionada, que genera valores tanto en una cola como en la otra. Antes de realizar el sistema de mensajes de tipo compuerta, los datos de dichas colas no proporcionan valores, dando un entorno erróneo de la simulación y, por ende, errores en el análisis posterior. Es importante tener en cuenta que los puntos en los cuales se encuentran esperando tres colas se hace una comprobación adicional netamente entre esas tres colas involucradas.

En cuanto a las restricciones del diseño, se puede evidenciar, inicialmente, el problema para llegar a la política óptima. Como se ha venido mencionando, el problema a tratar será abordado mediante un modelo de simulación; por lo tanto, en la búsqueda de la política óptima es posible que si bien se encuentre una opción favorable esta no necesariamente sea la óptima. Debido a lo anterior, se encuentra una restricción que puede limitar el alcance de la solución encontrada, dado que es posible no llegar al óptimo. A pesar de ello, el programa que se pretende usar permite comprender el problema y plantear una política aceptable que resuelva el problema de la programación de recursos.

Cabe resaltar que el diseño que se desea plantear será considerando un solo pozo, por lo cual la cuestión será acotada pensando en resolver el problema para un pozo en lugar de considerarlo en múltiples pozos, como ocurre generalmente en el sector. No obstante, la resolución del problema para uno de los pozos es fundamento suficiente para extender el alcance de la política a los demás e implementar la solución en múltiples pozos. Adicionalmente, el desarrollo de la política para un pozo es suficientemente amplio para llegar a resolver preguntas como ¿con qué tanta anticipación o dilatación se debe plantear la llegada de un recurso respecto al tiempo esperado? ¿Cuál sería el efecto si todos los gerentes o coordinadores de cada actividad se anticipan en simultáneo? o saber si esta anticipación puede variar a medida que el plan avanza en su ejecución.

Asimismo, es importante mencionar que, para el desarrollo del proyecto, se asume independencia entre las variables exógenas del modelo, como lo puede ser el nivel de la marea, el cual puede llegar a retrasar el arribo de un recurso. Es importante considerar que estas variables no se están contemplando en las restricciones del diseño; no obstante, se pueden incluir a través de redes bayesianas o distribuciones de probabilidad condicionales. En dado caso, el hecho de incluir este tipo de variables podría causar variaciones en el resultado.

Para poder cuantificar un verdadero impacto en el desarrollo de una política de programación de la llegada de insumos que minimice el costo total esperado, es necesario el uso de indicadores que revelen una mejoría o un retroceso con una política de control que para este caso es la determinista. Para esto, se cuenta con tres niveles de indicadores, como lo son la variación de los tiempos ociosos del proceso, la variación de los costos total esperados y la variación del tiempo total del proceso.

6. Resultados

En este apartado se evidencian los resultados correspondientes a cada política, donde se entenderá la Política 1 como P1, Política 2 como P2, Política 3 como P3 y Política 4 como P4. Adicionalmente se encontrará información de los diferentes niveles de cada política, que corresponden al 15% (nivel 1), 20% (nivel 2) y 30% (nivel 3), nombrados en el documento como N1, N2 y N3, respectivamente. Por lo tanto, se encuentran las combinaciones de políticas con niveles como P1N1, que indicaría la P1 en su porcentaje de reducción 15% correspondiente al N1.

Cabe mencionar que en la experimentación se encuentra algo llamado punto de cambio (esto aplica netamente para P2 y P4), el cual es el momento en el que se deja de atrasar para empezar a adelantar o viceversa. La notación para este en el documento será C, de tal modo que si es el punto de cambio en la actividad 10 se encuentra C10. Como se mencionaba anteriormente, la notación final que se puede encontrar vinculando los múltiples cambios podría ser P2N1C10; esto se leería como Política 2 en nivel de reducción 2 (20%) y con un punto de cambio en la actividad 10.

Ahora bien, para evaluar las políticas se implementan diferentes métodos, entre ellos se contemplan los métodos respecto a los aleatorios y respecto al cálculo de las políticas. Frente al método de los aleatorios se encuentran dos. El primer método se refiere al uso de diferentes conjuntos de datos para cada política; por lo tanto, cada política se simula de manera independiente y en un *Flexsim* diferente. El segundo método se refiere al uso del mismo conjunto de datos para las políticas; de este modo, todas las políticas se usan en el mismo *Flexsim* según el nivel, encontrándose así P1N1, P2N1, P3N1 y P4N1 con el mismo conjunto de datos y así sucesivamente, según los niveles.

Como se mencionaba anteriormente, existe otro método, que corresponde al cálculo de las políticas; existen dos de ellos por acumulados y por suma actividad. El primero se refiere a la manera en la que son obtenidos los datos de las variaciones de la duración determinista según cada política, tomando netamente los acumulados. De esta manera, la lista del subíndice i corresponde a los acumulados de las duraciones por actividad. Por tanto, si la política determinista indica un número a_n y se planea calcular la política de siempre retrasar en un porcentaje de retraso N1, en ese caso se realizaría la lista de los acumulados de estas a_n y se crearía la lista a_i , de donde se tomaría $a_i - (a_i * 15\%)$.

Finalmente, se encuentra el método por suma de actividad, el cual corresponde a calcular los datos de las variaciones sobre la determinista, pero basándose en la duración de la actividad, no en el acumulado de sus duraciones. Por lo tanto, recordando que a_i corresponde a la lista de acumulados, si la política determinista indica un número a_n y se planea calcular la política de siempre retrasar en un porcentaje de retraso del 15% (nivel 1), en ese caso se tomaría $a_i - (a_n * 15\%)$.

Política 1: según la metodología encontrada para la política, se procede con niveles extra -por lo tanto, se encuentran P1N4 y P1N5-; sin embargo, se encuentra que la mejor opción frente a la P1 es P1N2. Esta política arroja como resultado una disminución en un 23% del costo esperado y, adicionalmente, permite reducir en un 44% el tiempo total del proceso. De este costo esperado se reduce en un 43% el costo esperado por tiempo ocioso de la actividad. Con esto, se puede encontrar que esta política es buena cuando se desea reducir el costo y el tiempo del proceso, de manera que siempre se mantenga un stock en almacenamiento, ya que esta política se enfoca en siempre anticipar los pedidos.

Por otra parte, esta política puede permitir un poder de negociación mayor, dado que, al tener la opción de pedir los insumos un 20% del tiempo antes de lo esperado, se puede negociar con los proveedores con un tiempo anticipado y a un volumen estimado. Esto permite que el proveedor se beneficie en su programación, a la vez que la empresa pueda negociar los precios.

Política 2: respecto a esta política se encuentra que, frente a los métodos y cálculos empleados, su mejor punto es P2N2C8 y corresponde a la política ideal para la empresa, dado que en este caso reduce variabilidad y costo esperado. Si lo que se busca es reducción en tiempo total del proceso y costo esperado, esta política tiene unos indicadores de reducción del 13% en cuanto a costos totales y un 63% de reducción en el tiempo total de proceso. La P2 es ideal en este caso preciso y para una empresa que tenga estos objetivos sería la mejor.

Por una parte, esta política permite un poder de negociación, pese a que es limitado porque no se atrasa en todo el proceso; en cierto momento se puede negociar con proveedores. Por otra parte, permite reducir los costos de inventarios, dado que los insumos de las actividades finales no se encuentran esperando todo el tiempo. Dicho esto, se puede decir que, si se busca reducir almacenamiento además de costos y tiempos, esta política es una gran opción.

Política 3: para la P3 se encuentra su mejor nivel como P3N1. Según los indicadores, el hecho de siempre adelantar es uno de los peores escenarios, dado que aumenta el tiempo total del proceso en un 22%, generando un aumento de costos en un 102%. Es importante tener en cuenta que al adelantar siempre los insumos llegan tiempo después del proceso, lo que hace que las actividades esperen por el insumo siempre. Es por esto que el mejor nivel viene a ser el mínimo, dado que a medida que se adelanta en un porcentaje más alto, los costos crecen de la misma manera.

Política 4: con base en la P4 se tiene que manejar un principio similar a la P3 y se encuentra que en ningún punto es bueno manejar la estrategia de adelantar, dado que en su mejor nivel P4N1 aumenta los costos un 77% y el tiempo del proceso en un 17%. No se considera como el que más retrasa el proceso, debido a que, pese a que se adelanta en un principio, posteriormente logra equilibrar el tiempo. Sin embargo, el aumento de los costos es considerable y se basa en que, al adelantar las primeras actividades, tiende a mantener estancada una primera parte de la operación; pese a atrasar la parte final, las actividades iniciales retrasan el proceso completamente y los costos de su retraso causan una gran dificultad en la labor.

A continuación, se puede encontrar la metodología de decisión para cada etapa de la experimentación. En ella, se parte del mismo procedimiento, donde, inicialmente, se hace un análisis de varianzas bajo $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ y $H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$. Frente a este análisis se determina si los métodos impactan la variable de respuesta, dado que si se acepta H_0 se confirma que los efectos sobre la respuesta de los cuatro tratamientos son estadísticamente nulos. Por el contrario, si se rechaza H_0 se confirma que existe una diferencia entre los tratamientos frente a la variable de respuesta y, en ese caso, se analiza cuál tratamiento es mejor según la

variable de respuesta. Con el fin de confirmar los resultados, se realizan dos ANOVAS, una de ellas a partir de los costos totales y la otra a partir de los tiempos totales. Estos cálculos se pueden encontrar en los anexos “Doc. 17. Anovas diferentes aleatorios”, “Doc. 18 Anovas mismos aleatorios”, “Doc. 19 Anovas niveles extras mismo-aleatorios” y “Doc. 29 Anovas prueba final”.

MÉTODO DIFERENTES ALEATORIOS:

Por Acumulados

- Nivel 1:

En este caso, se estudia el efecto de un único factor que corresponde a la política usada tal que brinde el mejor rendimiento en términos de la variable de respuesta. Para ello, se toman los métodos de cada política y se evalúan en el N1 que corresponde al 15% de reducción o aumento en los tiempos, según sea el caso.

Como se mencionó anteriormente, se realiza un análisis de varianzas, donde con una confianza del 95% se tiene evidencia estadística para rechazar H_0 . Por lo tanto, se puede decir que los tratamientos sí generan un impacto diferente en la variable de respuesta. Gracias a lo anterior, se realizan pruebas adicionales para verificar cuáles de los tratamientos generan los resultados más favorables. Las pruebas adicionales de Tuckey y LSD aportan los siguientes datos:

$\mu_1 = \mu_2$	\$ 36.204	Significativo	LSD	\$ 24653,07
$\mu_1 = \mu_3$	\$ 229.762	Significativo	TUCKEY	\$ 26844,26
$\mu_1 = \mu_4$	\$ 206.817	Significativo		
$\mu_2 = \mu_3$	\$ 193.558	Significativo		
$\mu_2 = \mu_4$	\$ 170.613	Significativo		
$\mu_3 = \mu_4$	\$ 22.946	No significativo		

Tabla 1. Pruebas LSD y Tuckey nivel 1 acumulado

Se puede concluir, parcialmente, que, frente a los valores de los tratamientos planteados, no se encuentra una diferencia significativa entre las medias 3 y 4. Debido a lo anterior, se concluye que existe una diferencia entre el resto de las medias que resultan significativas; de tal modo, se procede a observar la Figura 11, donde se puede escoger entre las medias 3 y 4, dado que son estadísticamente similares. Según el cuartil 3 de la P4, se observa que la agrupación hasta el 75% de los datos es menor y, adicionalmente, la mediana y la media son menores respecto la P3.

Grupos	Promedio
Política 1	\$ 160.573
Política 2	\$ 196.777
Política 3	\$ 390.335
Política 4	\$ 367.390

Tabla 2. Promedio por tratamiento nivel 1 acumulado

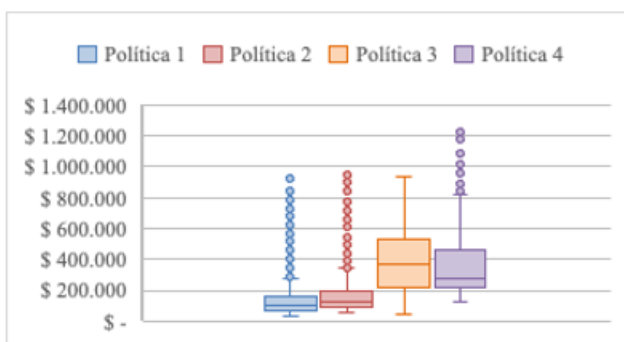


Figura 12. Gráfica de cajas y bigotes nivel 1 entre políticas acumulado

Partiendo del análisis anterior, queda una comparación final entre P1, P2 y P4. Desde el procedimiento anterior se observa que, pese a los valores extremos que tienen P1 y P2, el 75% de los datos son menores respecto a la política 4. Dicho esto, la comparación final es entre P 1 y P2, siendo finalmente escogida P1.

- Nivel 2:

Para este caso, se toman los métodos de cada política y se evalúan en N2, que corresponde al 20% de reducción o aumento en los tiempos, según sea el caso. En esta situación, el resultado del análisis de varianza, con un 95% de confianza, arroja evidencia estadística para rechazar H_0 , dado que el valor de F es mayor a su valor crítico. Partiendo de ello, se realizan las pruebas *LSD* y *Tuckey*, las cuales aportan los siguientes resultados:

$\mu_1 = \mu_2$	\$ 48.763	Significativo	LSD	\$ 23944,25
$\mu_1 = \mu_3$	\$ 316.987	Significativo	TUCKEY	\$ 26072,44
$\mu_1 = \mu_4$	\$ 262.605	Significativo		
$\mu_2 = \mu_3$	\$ 268.224	Significativo		
$\mu_2 = \mu_4$	\$ 213.842	Significativo		
$\mu_3 = \mu_4$	\$ 54.382	No significativo		

Tabla 3. Pruebas *LSD* y *Tuckey* nivel 2 acumulado

De manera similar a N1, se puede observar que, con una confianza del 95%, la media 3 y la media 4 son similares; por lo tanto, queda una comparación entre P 1, P2 y P4. Como se observa en la Figura 12 se encuentra que, pese a los niveles extremos de P1, su mediana y su cuartil 3 se convierten en los menores valores frente al resto de las políticas. De esta manera, se puede afirmar que, estadísticamente, el 75% de los valores de P 1 son menores al resto de las políticas, pese a la cercanía con P2.

Grupos	Promedio
Política 1	\$ 156.139
Política 2	\$ 204.901
Política 3	\$ 473.125
Política 4	\$ 418.744

Tabla 4. Promedio por tratamiento nivel 2 acumulado

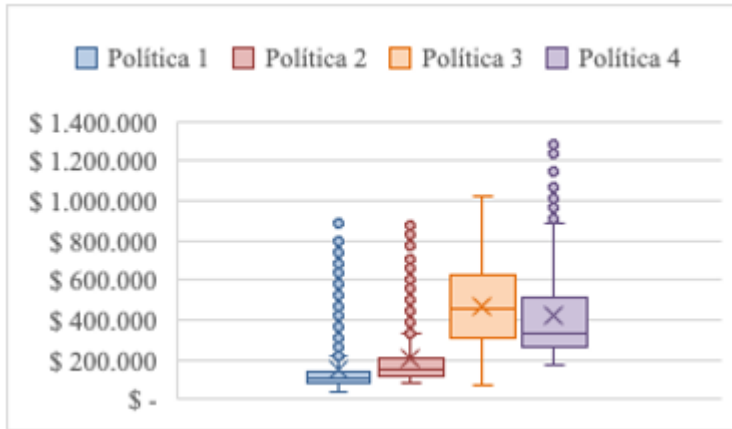


Figura 23. Gráfica de cajas y bigotes nivel 2 entre políticas acumulado

- Nivel 3:

En este caso, se presenta una reducción o aumento en un 30%. Para este nivel, igualmente, se rechaza H_0 con un 95% de confianza y se procede con las pruebas adicionales, como se observa en la Tabla 5. En este caso, hay evidencia estadística para descartar alguna de las interacciones entre medias, dado que todas son significativas.

$\mu_1 = \mu_2$	\$ 74.478	Significativo	LSD	\$ 22768,92
$\mu_1 = \mu_3$	\$ 491.258	Significativo	TUCKEY	\$ 24792,64
$\mu_1 = \mu_4$	\$ 366.364	Significativo		
$\mu_2 = \mu_3$	\$ 416.779	Significativo		
$\mu_2 = \mu_4$	\$ 291.886	Significativo		
$\mu_3 = \mu_4$	\$ 124.893	Significativo		

Tabla 5. Pruebas LSD y Tuckey nivel 3 acumulado

De esta manera, dado que todas las diferencias son significativas, se observa que, según la gráfica, los mejores tratamientos corresponderían a los valores de P 1 y P2. Sin embargo, se observa que P1 es ligeramente mejor respecto a P2.

Grupos	Promedio
Política 1	\$ 161.259
Política 2	\$ 235.738
Política 3	\$ 652.517
Política 4	\$ 527.624

Tabla 6. Promedio por tratamiento nivel 3 acumulado

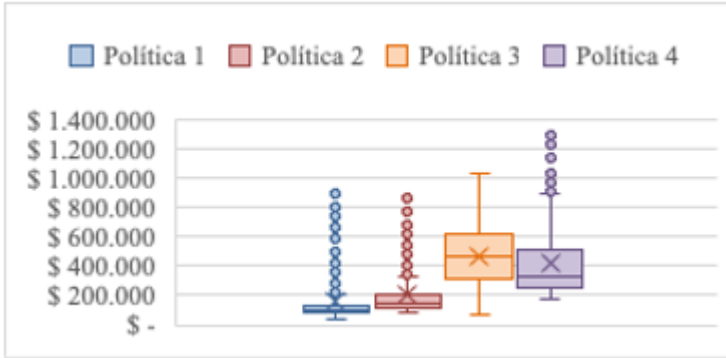


Figura 34. Gráfica de cajas y bigotes nivel 3 entre políticas acumulado

Como se puede apreciar, frente a las comparaciones de los tres niveles iniciales existe evidencia estadística para afirmar que la mejor es P1, seguida de P2. Partiendo de ello, se tomarán los tres niveles de la política para verificar el mejor rendimiento, como se observa en la Figura 13.

Niveles	Promedio
Nivel 1	\$ 160.573
Nivel 2	\$ 156.139
Nivel 3	\$ 161.259

Tabla 7. Promedio por niveles política 1 acumulado

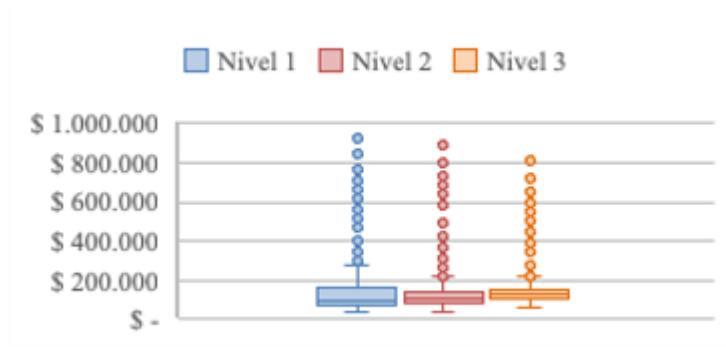


Figura 15. Gráfica de cajas y bigotes nivel 3 entre niveles acumulado

A partir de las tablas y figuras, es posible constatar que no existe una diferencia significativa entre estas políticas en cuanto a sus valores de promedios, lo cual se comprueba estadísticamente, dado que al realizar la ANOVA se acepta la hipótesis nula. Pese a ello, para efectos del trabajo, se toma el mejor nivel, en este caso corresponde a N2, debido a que, como se puede ver en la Figura 7, N1 tiene una variabilidad mayor: sus datos se encuentran sesgados hacia valores más altos y tiene valores atípicos mayores pese a su mediana. Por su parte, N3 no se encuentra sesgado y sus datos se encuentran estrechamente agrupados; sin embargo, son mayores respecto a N2.

Por Suma de Actividad

- Nivel 1:

Frente al este nivel (15%) se puede concluir que se rechaza H_0 . A partir de ello, se realizan las pruebas adicionales *LSD* y *Tuckey*, de donde se obtienen resultados, mostrados en el apartado anterior. Estos, además, pueden ser consultados en el anexo.

Gracias a lo anterior, se puede concluir, con una confianza del 95%, que, frente a los valores de los tratamientos planteados, no se encuentra una diferencia significativa entre las medias 2 – 4 y 3 – 4. Debido a lo anterior y gracias a la gráfica de cajas y bigotes presente en el anexo “Doc. 17. Anovas diferentes aleatorios”, se observa que P 2, P3 y P4 tienen tendencias similares. Adicionalmente, P1 tiende a ser la de mayor variabilidad y mayores datos. Por lo tanto, la decisión entre P 2, P3 y P4 se basa en el promedio, siendo la mejor P3, tomando en cuenta, también, que es la que menos puntos atípicos tiene.

- Nivel 2:

Para este nivel, el resultado del análisis de varianza presenta la evidencia estadística para, con un 95% de confianza, rechazar H_0 . Partiendo de ello, se realizan las pruebas adicionales, *LSD* y *Tuckey* las cuales pueden ser consultadas en el anexo “Doc. 17 Anovas diferentes aleatorios”.

A partir de estas pruebas, se puede observar que con una confianza del 95% las medias 2–4 y 3–4 son similares. Por lo tanto, entre 2–4 se escoge P 4 y entre 3–4 se escoge P3. Finalmente, queda una comparación entre la política 3 y la política 1 de donde se observa que gracias a la cantidad de datos atípicos de 1 es mejor resulta mejor para la variable de resultado la política 3.

- Nivel 3:

Frente a este nivel, se rechaza H_0 con un 95% de confianza y se procede con las pruebas adicionales, como se observa en el anexo “Doc. 17 Anovas diferentes aleatorios”. Se encuentra que las medias que no tienen diferencia significativa son la media 3 y 4; por lo tanto, al escoger entre ellas se evidencia que la mejor media es la 3 y, al compararla con las otras dos políticas, esta sigue siendo la mejor en términos de promedio, mediana, variabilidad y puntos atípicos. La ampliación de estos datos y la gráfica correspondiente se puede validar en el anexo “Doc. 17 Anovas diferentes aleatorios”.

Como se puede apreciar entre las comparaciones de los tres niveles en el método “suma de actividades”, existe evidencia estadística para decir que la mejor política es P3, seguida de P4. Partiendo de ello, se toman los tres niveles de la política para verificar el mejor rendimiento, como se observa en la Figura 14.

<i>Niveles</i>	<i>Promedio</i>
Nivel 1	\$ 209.371
Nivel 2	\$ 212.593
Nivel 3	\$ 220.793

Tabla 8. Promedio por niveles política 3 por actividad

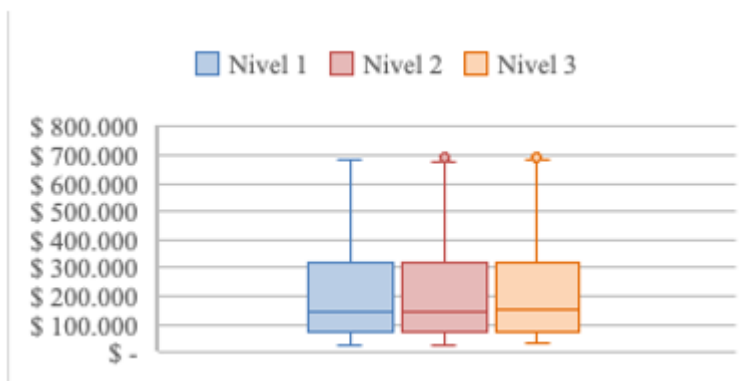


Figura 16. Gráfica de cajas y bigotes política 3 entre niveles por actividad

Las anteriores gráficas permiten observar que no existe una diferencia significativa entre los niveles analizados. Sin embargo, se puede verificar que existe una ligera mejoría con N1, teniendo en cuenta que este no posee datos atípicos que afecten su promedio.

MÉTODO MISMOS ALEATORIOS:

Por Acumulados

Como se indica anteriormente se decide continuar por el método por acumulados y, con el fin de generar una comparativa más certera entre mismos aleatorios y diferentes aleatorios, se procede a hacer los experimentos iniciales por este método con los mismos niveles iniciales de las políticas. De acuerdo con esto, se puede consultar el anexo “Doc 18. Anovas mismos aleatorios”, donde se encuentran los resultados finales de esta primera etapa. Con este análisis se encuentra que la mejor política es PIN2. Estos resultados se hallan conforme a los métodos anteriores (ANOVA, pruebas adicionales) y pueden ser verificados en el mismo anexo.

Gracias a estos resultados se hace una comparación final de métodos entre mismos y diferentes aleatorios. En esta operación, se evidencia que el mejor método es el de mismos aleatorios, lo cual es relevante debido a que usar los mismos aleatorios para cada corrida con todos los tratamientos ayuda a que la variabilidad se disminuya y los datos puedan ser más precisos. En las Tablas 9 y 10 se encuentran los ganadores entre ambos métodos y se confirma como método a seguir el de mismos aleatorios, por las razones anteriormente expuestas.

Niveles	Promedio	Varianza
Nivel 1	\$ 160.573	29.913.470.460
Nivel 2	\$ 156.139	24.528.624.488
Nivel 3	\$ 161.259	16.064.486.709

Tabla 9. Valores de la política ganadora 1 por método diferentes aleatorios

Niveles	Promedio	Varianza
Nivel 1	\$ 160.573	29.907.273.926
Nivel 2	\$ 156.139	24.527.774.512
Nivel 3	\$ 161.259	16.064.522.108

Tabla 10. Valores de la política ganadora 1 por método mismos aleatorios

Adicionalmente, se decide realizar nuevas corridas con nuevos niveles y puntos de cambio, con el fin de verificar si hay alguna mejor opción, ampliando el panorama. Estos cambios consisten en nuevos niveles o porcentajes de variación frente a todas las políticas, así como nuevos puntos de cambio en P2, dado que es una

de las políticas que arroja mejores resultados luego de P1. De este modo, esta fase arroja los siguientes resultados:

- Nivel 1:

En este se rechaza H_0 y se realizan las pruebas adicionales LSD y Tuckey; se pueden observar los cálculos pertinentes en el anexo “Doc 19. Anovas niveles extra mismos aleatorios”, donde se presenta una comparativa entre ocho políticas diferentes teniendo en cuenta los puntos de cambio. En los resultados, se puede observar que no resultaron significativas m1–m2, m2–m3, m4–m5, m4–m6 y m5–m6.

<i>Serie</i>	<i>Grupos</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
1	Política 1	\$ 160.574	\$ 29.907.273.926
2	Política 2 con punto de cambio 8	\$ 180.768	\$22.227.582.536
3	Política 2 con punto de cambio 9	\$ 197.829	\$29.055.273.189
4	Política 4 con punto de cambio 10	\$ 243.033	\$29.393.586.338
5	Política 2 con punto de cambio 11	\$ 226.200	\$39.433.145.295
6	Política 2 con punto de cambio 12	\$ 237.745	\$43.509.846.764
7	Política 3	\$ 418.219	\$72.200.115.315
8	Política 4	\$ 367.259	\$52.702.561.490

Tabla 11. Promedio por tratamiento nivel 1 por actividad

Entre las parejas encontradas, se inicialmente aparece como mejor aquella correspondiente a P1, gracias a su promedio, su mediana y la atribución de sus datos, donde el cuartil 3 abarca datos menores respecto al resto. Sin embargo, se puede apreciar que la segunda mejor es P2 y, en este caso, se observa que existe evidencia estadística para definir que entre ellas no existe una diferencia significativa. Frente a esta evidencia, se analiza la varianza, dado que se busca reducir la variabilidad. Con este cálculo, la mejor opción corresponde a P2.

- Nivel 2:

Este nivel corresponde, nuevamente, al 20%. Al momento de realizar el análisis de varianzas se rechaza la hipótesis nula y, por tanto, se procede a realizar las pruebas adicionales, las cuales se pueden encontrar en el anexo “Doc 19. Anovas niveles extra mismos aleatorios”. En este anexo se puede encontrar que las pruebas arrojaron las medias 2–3, 4–6 y 5–6 como no significativas, razón por la cual, analizando los datos obtenidos entre estas medias, se escogen inicialmente la 2 y la 4.

Partiendo de lo anterior, se realiza la comparación con las políticas que no tienen una diferencia significativa, escogiendo como mejor, inicialmente, P1, dado que esta tiene el mejor promedio. Sin embargo, teniendo en cuenta la varianza de la posible política ganadora, entra en apreciación la segunda mejor política, la P2, en el punto de cambio al 8. Gracias a esto, se usa como indicador el coeficiente de variación, de tal modo que provea una homogeneidad frente a ambas medidas. Los resultados de esto indican que el mejor coeficiente es de P2 al punto de cambio 8, debido a que su coeficiente es 66, mientras que el de P1 es 100 y, según el indicador, entre menor el valor es mejor el resultado.

Para N3, N4 y N5 se observa en la Tabla 12 que sus valores son mayores en términos de costos; por lo tanto, son menos favorables a la variable de respuesta. Sin embargo, se realiza un análisis con las mejores políticas de cada uno, las cuales corresponden a P1 y P2 con punto de cambio 8.

Política	Nivel	Desviación	Media	CV
P1	3	\$ 126.746	\$ 161.259	79%
	4	\$ 100.273	\$ 179.006	56%
	5	\$ 76.566	\$ 203.718	38%
P2 al 8	3	\$ 86.827	\$ 224.389	39%
	4	\$ 66.091	\$ 269.657	25%
	5	\$ 55.867	\$ 293.158	19%

Tabla 12. Resultados principales niveles adicionales

Como se observa en la Tabla 12, las medias de P 1 son notablemente menores. A pesar de ello, al verificar el coeficiente de variabilidad se observa que, en todas las comparaciones, P2 en el punto de cambio 8 tiene mejor rendimiento, dado que su variabilidad es menor.

Ahora bien, se tiene en cuenta que, en las realizaciones con diferentes aleatorios, la varianza en P1 es la menor respecto a promedios y varianzas. Sin embargo, usando este nuevo método, se encuentra que la varianza incrementa sobre todo P1. Dicho lo anterior, durante este apartado se analiza un nuevo factor, a saber, el coeficiente de variación y frente a él se observa que la mejor política por este método es P1 en términos de promedio, pero en varianza quedan equilibrados con P2. En sus mejores niveles, los resultados son los siguientes:

Nivel	Política	Promedio	Varianza
1	Política 1	\$ 180.768	\$22.227.582.536
2	Política 2 con punto de cambio 8	\$ 191.014	\$15.678.197.277
3	Política 2 con punto de cambio 9	\$ 224.389	\$7.538.944
4	Política 4 con punto de cambio 10	\$ 269.656	\$4.368.062.052
5	Política 2 con punto de cambio 11	\$ 226.200	\$39.433.145.295
6	Política 2 con punto de cambio 12	\$ 293.158	\$3.121.078.974

Tabla 13. Resultados favorables niveles adicionales

Gracias a esta nueva simulación, se encuentra que la variabilidad disminuye. Sin embargo, aún se desea confirmar que la diferencia entre P 1 y P2 se puede definir usando el coeficiente de la variabilidad. Debido a que el mejor nivel, en términos generales, es N2, se desarrolla una prueba adicional con el doble de realizaciones, buscando disminuir la variabilidad aún más. Desde la simulación final se observa que, según los cálculos del anexo “Doc. 29. Anovas prueba final”, las pruebas *LSD* y *Tuckey* arrojan que la diferencia entre estas políticas no es significativa. Por lo tanto, escoger cualquiera de ellas no genera un efecto diferente en la variable de respuesta, razón por la que, conservando el equilibrio respecto a promedio y varianza, se decide seleccionar como mejor tratamiento P2 en punto de cambio 8.

7. Limitaciones, conclusiones y recomendaciones.

Durante el desarrollo del experimento se deja en evidencia la importancia de la planeación sobre los tiempos de llegada de insumos dentro de los procesos productivos, ya que una buena planeación sobre estos se ve reflejada en una reducción significativa sobre los costos finales del proyecto. Para poder llevar a cabo este

tipo de experimentos se deben tener en cuenta diversos tipos de factores estadísticos, tales como las distribuciones de los datos, la estadística descriptiva, los supuestos sobre los datos, la homogeneidad, entre otros. Estos valores ayudan, posteriormente, a dar un rumbo más preciso al proyecto.

Se puede concluir, además, que existe una gran influencia en los costos debido al momento en el cual llega cada uno de los insumos en cada actividad; por tal motivo, el presente estudio puede ser de gran relevancia en industrias similares. La toma de decisiones tiene una gran influencia tanto positiva como negativa en los costos; realizar experimentos genera información que puede ser tomada para ajustar la decisión al siguiente paso y no cometer el mismo error en el siguiente experimento, es decir, el caer en el error no implica invalidar el experimento realizado. Por lo tanto, para realizar este tipo de estudio experimental es necesario aplicar el Ciclo de Deming.

De esta manera, y para el caso de diseño experimental aplicado, se utiliza el ciclo de Deming en donde, a lo largo del proceso, se pueden observar diferentes conjeturas que son relevantes al momento de tomar decisiones. Una de ellas es la variación de los datos a lo largo del experimento para cada una de las políticas, a la vez que el promedio de los costos. La alta variación que se puede observar en P 1 indica que el resultado de esta puede cambiar drásticamente al realizar diferentes repeticiones y, aunque su promedio de costos es bajo, su fiabilidad no es la mejor. Lo contrario sucede con P 3 y P4, las cuales tienen una variabilidad baja; sin embargo, su promedio en cuanto a costos es superior respecto a las otras políticas, lo que implica que no son la mejor opción para minimizar costos. Adicionalmente, se puede concluir que la mejor política en este caso de estudio es P2, la cual tiene la variabilidad más baja de todas las políticas, pese a que su media es la mejor seguida de la política 1.

Ahora bien, se debe tener en cuenta que el proyecto está enfocado exclusivamente en el plan productivo de un solo pozo petrolero, es decir, se podría realizar un análisis aún más detallado y amplio en donde se tengan en cuenta diversos insumos dentro de varios pozos; esto podría representar una disminución del costo y la variabilidad para la compañía más significativa. En adición a esto, el modelo de simulación está limitado a un solo recurso por actividad; en caso de buscar ampliar el alcance del diseño, se deben realizar modificaciones en el modelo planteado. Asimismo, el esquema establecido para el presente trabajo fue sugerido por un experto y los datos fueron otorgados por un experto en el tema, por lo tanto, los datos obtenidos no corresponden fehacientemente a los valores exactos de un proceso petrolero offshore. Esto anterior disminuye la precisión que se puede tener en los resultados; sin embargo, comprenden una muestra suficientemente fuerte para resolver los objetivos planteados.

Se recomienda replicar el modelo en otros tipos de procesos productivos. Es importante recalcar que el presente proyecto se encuentra en un contexto general, lo cual facilita su adaptación a procesos de diferentes industrias. La importancia del modelo en este caso no radica en su contexto específico, sino en su posibilidad de diversificación tal que se pueda replicar para diversos problemas con requerimientos similares.

Finalmente, es fundamental para el desarrollo de este tipo de experimentos contar con una herramienta como *Flexsim*, la cual facilita el estudio de los diferentes escenarios simulados que se pueden abarcar en este tipo de trabajos. Sin embargo, se podría ampliar el alcance del proyecto experimentando con otros tipos de funcionalidades del programa como se mencionó anteriormente.

Referencias

- Albornoz, V. y Contesse, L. (1999). Modelos de Optimización Robusta para un Problema de Planificación Agregada de la Producción bajo Incertidumbre en las Demandas. Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Ayuso, A., Escudero, L., Garín, A., Ortuño, M. & Pérez, G. (2003). An Approach for Strategic Supply Chain Planning under Uncertainty based on Stochastic 0-1 Programming. *Journal of Global Optimization*.
- Erdogan, A. & Denton, B. (2011). Dynamic Appointment Scheduling of a Stochastic Server with Uncertain Demand. *Journal on Computing*, 25(1) 116-132.
- Ghalayini, Latifa. (2011). The Interaction between Oil Price and Economic Growth. *Middle Eastern Finance and Economics*. 13. 127-141.
- Haugen, K. (1996), A Stochastic Dynamic Programming model for scheduling of offshore petroleum fields with resource uncertainly. *THEORY AND METHODOLOGY*, Pg 88-100.
- KEANE, Michael. Simulation estimation for panel data models with limited dependent variable. 1993.
- Layeb, S., Jaoua, A., Jbir, A. & Makhoulf, Y. (2018). A simulation-optimization approach for scheduling in stochastic freight transportation. *Computers & Industrial Engineering* 126 99-110.
- Levin, R. (2015). How to fix a scheduling system breakdown. *Dental Economics*, recuperado de <http://www.dentaleconomics.com>.
- Malinverno, I., Prange, M., Gonfalini, M., Moffat, J., Swager, D., Theys, P. & Verga, F. (2003). Comprensión de la incertidumbre - Oilfield review.
- Mohammad R., Mohammad K., Fereydoon K. & Kobra E. (2011). An optimal procedure for minimizing total weighted resource tardiness penalty costs in the resource-constrained project scheduling problem, *COMPUTERS & INDUSTRIAL ENGINEERING*. 2011- Pg 267-270.
- ROSNEFT, (2019). Equipment and tools for offshore fields development, general requirements, and operating conditions. ROSNEFT, Disponible en: https://www.rosneft.com/business/Upstream/Offshore_equipment/.
- Silcio O., Marco V. (1997), Exergy Analysis of petroleum separation processes in offshore platforms. PERGAMON.
- Silcio O. & Marco V. (1997). Exergy Analysis of petroleum separation processes in offshore platforms. PERGAMON.
- Smith, J. S. (2003). Survey on the Use of Simulation for Manufacturing System Design and Operation. *Journal of Manufacturing Systems*, 157-172.
- Stratta, E. (2016), El precio del crudo y su historia. *TENDENCIAS*.
- Terry, J. (2012). Linux kernel co scheduling and bulk synchronous parallelis. *HIGH PERFORMANCE COMPUTING APPLICATIONS*, 136-145.
- Wang, X. & Fung, R. (2014). An option-based hedging mechanism for managing the risk of overbooking in parallel airline alliances. *Transportation Research Part E*, 146-162.